DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170115

张影, 刘星, 焦瑞锋, 李东方, 任秀娟, 吴大付, 陈锡岭. 生物质炭与有机物料配施的土壤培肥效果及对玉米生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1287−1297

Zhang Y, Liu X, Jiao R F, Li D F, Ren X J, Wu D F, Chen X L. Effects of combined biochar and organic matter on soil fertility and maize growth[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(9): 1287−1297

# 生物质炭与有机物料配施的土壤培肥效果及对玉米生长的影响*

张 影, 刘 星, 焦瑞锋, 李东方, 任秀娟, 吴大付, 陈锡岭

(河南科技学院资源与环境学院 新乡 453003)



**摘 要:** 生物质炭作为一种多功能的土壤培肥材料被广泛应用, 但其与传统有机物料的对比及配施研究还比较少。通过盆栽试验, 研究了生物质炭与秸秆、发酵鸡粪单施及配施对壤质潮土和砂土养分含量、酶活性及玉米生长的影响, 并采用主成分分析方法对 3 种有机物料的培肥效果进行综合评价。试验设 6 个处理, 分别为不添加有机物料(CK)、添加生物质炭(BC)、小麦秸秆(WS)、发酵鸡粪(CM)、秸秆和生物质炭(WS+BC)、鸡粪和生物质炭(CM+BC)。研究结果表明, 各处理均增加了砂土玉米生物量和株高, 3 种有机物料的提升幅度排序为: 鸡粪>生物质炭>秸秆, 鸡粪还可增加壤质潮土玉米生物量和株高。添加生物质炭和有机物料还可提高土壤有机质含量, 其中生物质炭的提升幅度最大。此外, 3 种有机物料对土壤养分和酶活性的影响各异, 单施鸡粪分别增加壤质潮土和砂土的碱解氮 22.08%和 26.67%, 速效磷 91.92%和 53.65%, 脲酶活性 40.54%和 36.94%; 单施生物质炭分别增加壤质潮土和砂土速效磷 83.52%和 89.91%, 速效钾 79.38%和 127.02%, 过氧化氢酶活性 3.41%和 11.22%, 却降低了土壤碱解氮含量, 且与鸡粪配施后会抑制鸡粪中氮的有效性; 单施秸秆分别增加壤质潮土和砂土速效钾 49.48%和 63.02%, β-葡糖苷酶活性 51.86%和 59.09%; 生物质炭与鸡粪或秸秆配施可以更均衡地提升土壤肥力。通过主成分分析和相关分析发现, 玉米生物量和株高与土壤氮、磷供应正变化的第 2 主成分(PC2)得分呈极显著正相关关系。因此, 3 种有机物料中, 鸡粪对土壤氮、磷含量及相关酶活性影响最大; 秸秆对土壤钾以及纤维素分解相关酶影响较大, 而生物质炭对土壤肥力的提升作用更均衡, 且土壤肥力综合得分最高。秸秆或鸡粪配施生物质炭可以更全面地提高土壤肥力。

**关键词:** 生物质炭; 有机物料; 玉米; 土壤肥力; 土壤酶活性

**中图分类号:** S141 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)09-1287-11

# Effects of combined biochar and organic matter on soil fertility and maize growth*

ZHANG Ying, LIU Xing, JIAO Ruifeng, LI Dongfang, REN Xiujuan, WU Dafu, CHEN Xiling

(College of Resources and Environment Science, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

**Abstract:** As a new functional material, biochar can increase soil carbon pool, improve soil quality and increase crop yield because of its particulate physical and chemical properties and is thus widely used in agriculture. However, studies on the

* 河南省科技攻关计划项目(农业领域)(162102110018)资助
张影, 主要从事土壤养分循环及调控方面研究。E-mail: yingzh2014@163.com
收稿日期: 2017-02-13 接受日期: 2017-03-30

* This study was supported by the Key Science and Technology Program of Henan Province (Agriculture) (162102110018).
Corresponding author, ZHANG Ying, E-mail: yingzh2014@163.com
Received Feb. 13, 2017; accepted Mar. 30, 2017

comparison between biochar and traditional organic matter and their combined application are relatively rare. Thus a pot experiment was conducted to study the effect of the separate application of biochar, straw and chicken manure or their combined application on nutrient status, enzyme activity of soil and maize growth in fluvo-aquic loamy and sandy soils. Principal component analysis and simple correlation analysis were also used to synthetically evaluate the effects of different treatments and to determine the main driving factors of maize growth. All in all, a total of six treatments were conducted: control (CK), biochar (BC), wheat straw (WS), chicken manure (CM), wheat straw plus biochar (WS+BC) and chicken manure plus biochar (CM+BC). The results showed that all treatments increased maize biomass and height in sandy soil, the order of treatments in terms of maize growth was CM+BC = CM > WS+BC, BC > WS > CK, and manure could also increase maize biomass and height in fluvo-aquic loamy soil. Biochar and organic matter increased soil organic matter content, with the former particularly inducing a sharp increase. Different treatments showed different effects on soil nutrients and enzyme activities in both fluvo-aquic loamy and sandy soils. Chicken manure respectively increased soil available N by 22.08% and 26.67%, available P by 91.92% and 53.65%, and urease activity by 40.54% and 36.94% in fluvo-aquic loamy and sandy soils. Biochar respectively increased soil available P by 83.52% and 89.91%, soil available K by 79.38% and 127.02%, and soil catalase activity by 3.41% and 11.22% in the two soil types. Wheat straw respectively increased soil available K by 49.48% and 63.02%, soil β-glucoside enzyme activity by 51.86% and 59.09% in both fluvo-aquic loamy and sandy soils. Overall, combined application of biochar and manure or straw complemented each other and thereby improved more comprehensively soil fertility. Principal component analysis and correlation analysis suggested that maize biomass and height were highly significantly correlated with the second principal component score (PC2), which led to the positive changes in soil N and P pool. Therefore, among the three forms of organic matter, chicken manure influenced soil N and P contents and the related enzyme activities the most. Straw greatly influenced soil K and cellulose degradation-related enzymes, while biochar more evenly enhanced soil fertility which led to the most comprehensive gains in soil fertility. Straw or chicken manure, combined with biochar, more comprehensively improved soil fertility.
**Keywords:** Biochar; Organic matter; Maize; Soil fertility; Soil enzyme activity



土壤肥力和生产能力是保证粮食安全的根本。在全球范围内，有限的耕地面积增长潜力是限制粮食生产的主要问题，发展集约化农业，提高单位耕地粮食产出是满足日益增长粮食需求的唯一出路[1]。施肥是保证土壤肥力的主要手段，是促使粮食产量增长的一个极其重要的因素[2]。近年来，化肥产业发展迅速，并且在粮食生产中发挥举足轻重的作用，是保证粮食高产的基本要素。然而，有机肥在肥料中所占的比重越来越低，化肥的过量施用使其在粮食增产中的作用逐年降低，同时造成土壤质量下降[3]。农田土壤中的活性有机碳正在被逐年消耗，导致土壤阳离子交换量下降，加速矿质养分淋失，降低肥料利用率[4]。因此，重视有机肥的施用，提升农业废弃物的利用效率，推广有机无机肥配施技术是提升土壤肥力和粮食生产能力的必然趋势。有机肥对土壤肥力的提升作用已被大量学者证明，施用有机肥不仅可以提高土壤的团聚体结构和稳定性，降低土壤容重，改善土壤理化性状[5-7]，还可以提高土壤微生物活性和酶活性[8-9]。

农作物秸秆在完全或部分缺氧的情况下经高温热解炭化产生的生物质炭在农业上的应用逐渐被关注。生物质炭具有独特的多孔隙结构，并含有丰富的矿质养分，可以改善土壤保水保肥能力和透气性，增加土壤微生物活性，提高农作物产量，是一种新型的培肥改土材料[10-12]。生物质炭还可以作为一种肥料增效剂，减少化肥中养分淋失，增加氮肥利用率，保持土壤有机质的稳定性，减缓有机肥中活性有机碳的分解速度，并减少碳排放[13-15]。因此，生物质炭与有机肥料或化肥配施是近年来研究的热点，也为肥料的高效利用提供了新的方向[7,16]。前人研究发现，生物质炭与有机肥配施可以克服各自的弊端，更全面地提升土壤碳库储量和养分含量，并进一步提升作物养分吸收效率，增加作物产量[17-19]。但是，有机肥和生物质炭配合施用对土壤的改良效果可能受诸多因素的制约，比如说有机肥的种类[19]、生物质炭的制备材料和制备工艺[20-21]、土壤类型[22]等。因此，本研究以河南省粮食主产区壤质潮土和黄河泛滥沉积物发育而成的砂土为研究对象，探究小麦秸秆生物质炭、发酵鸡粪和小麦秸秆对土壤养分状况、酶活性以及玉米生长状况的影响，为生物质炭和有机肥在田间的推广应用提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤采自河南省新乡市小麦-玉米一年 2 熟轮作主产区 0~20 cm 耕层，土壤类型分别为壤质潮土和黄河泛滥沉积物发育而成的砂土。壤质潮土 pH

8.01, 有机质 12.6 g·kg$^{-1}$, 全氮 0.92 g·kg$^{-1}$, 碱解氮 75.5 mg·kg$^{-1}$, 速效磷 24.8 mg·kg$^{-1}$, 速效钾 192.3 mg·kg$^{-1}$; 砂土 pH 8.25, 有机质 8.3 g·kg$^{-1}$, 全氮 0.78 g·kg$^{-1}$, 碱解氮 63.0 mg·kg$^{-1}$, 速效磷 39.5 mg·kg$^{-1}$, 速效钾 146.2 mg·kg$^{-1}$。

供试玉米品种为'滑玉-12'。有机物料分别为生物质炭(BC)、小麦秸秆(WS)和发酵鸡粪(CM)。小麦秸秆于 2015 年 5 月小麦收获前在田间采集得到, 带回实验室烘干、粉碎后备用。发酵鸡粪为市售产品, 由新鲜鸡粪添加生物菌种高温发酵、烘培、筛分而成。生物质炭为自制秸秆碳, 首先将采集小麦秸秆烘干、粉碎, 将粉末填满陶瓷坩埚并加盖, 在限氧条件下升温至 350 ℃, 并保持 4 h, 自然冷却至室温, 装袋备用。供试有机物料的养分含量见表 1。

**表 1　试验用有机物料养分含量**
Table 1　Nutrients contents of organic materials used in the experiment

| | 有机碳 Organic C (g·kg$^{-1}$) | 全氮 Total N (g·kg$^{-1}$) | 碳氮比 C/N | 全磷 Total P (g·kg$^{-1}$) | 全钾 Total K (g·kg$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 生物质炭 Biochar | 684.8 | 14.5 | 47.2 | 10.5 | 28.7 |
| 发酵鸡粪 Chicken manure | 166.4 | 22.3 | 7.5 | 9.8 | 7.5 |
| 小麦秸秆 Wheat straw | 356.7 | 8.4 | 42.5 | 1.7 | 13.4 |

### 1.2　试验设计

采用盆栽试验方法, 设置 6 个处理, 分别为: 对照(CK)、添加生物质炭(BC)、添加小麦秸秆(WS)、添加发酵鸡粪(CM)、添加小麦秸秆和生物质炭(WS+BC)、添加发酵鸡粪和生物质炭(CM+BC), 每个处理重复 3 次, 生物质炭、小麦秸秆和发酵鸡粪的施用量均为风干土质量的 1.5%。试验采用 20 cm×10 cm (直径×深度)塑料盆, 每盆装风干过筛(2 mm)土壤 2.5 kg。播种前按每千克土 N 0.20 g、$P_2O_5$ 0.15 g、$K_2O$ 0.20 g 施入尿素、磷酸二氢铵和氯化钾, 所有无机肥料和有机物料作为基肥一次施用。该试验于 2015 年 5 月 20 日布置, 并播种玉米种子, 每盆播种 10 粒, 出苗后每盆留长势一致的植株 3 株, 所有处理日常管理一致。2015 年 7 月 20 日调查玉米植株长势, 并采集样品。

### 1.3　样品采集与分析

植物样品采集: 将每盆 3 株植株全部取出, 先后用自来水、去离子水清洗干净, 用吸水纸擦干, 从最上部节根处截断, 分为地上部和根系, 将地上部和根系自然放置, 测量株高和根长, 然后将根系和地上部混合放置于牛皮袋中, 烘干称重, 记干重生物量。土壤样品采集: 植株样品采集完毕后, 将每盆土壤完全混匀, 采用四分法将土壤样品筛分至大约 500 g, 置于阴凉处自然风干, 并分别过 1 mm 和 0.15 mm 筛, 装袋备用。

土壤养分含量和酶活性测定: 土壤 pH 采用 pH 计测定, 水土比为 2.5∶1; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法、土壤全氮采用硫酸加速剂消煮-凯氏定氮法、土壤碱解氮采用碱式扩散法、土壤有效磷采用 0.5 mol·L$^{-1}$ $NaHCO_3$ 浸提-钼蓝比色法、土壤速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度计法测定[23]; 土壤脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法、土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法、土壤蔗糖酶和纤维素酶活性利用 3, 5-二硝基水杨酸比色法[24]、土壤 L-天冬酰胺酶活性和土壤 β-葡糖苷酶活性采用吴金水等介绍的方法测定[25]。

### 1.4　数据分析

所有数据采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS PASW Statistics 18.0 进行统计分析, SigmaPlot 10.0 绘图。

## 2　结果与分析

### 2.1　生物质炭与有机物料对玉米生物量及长势的影响

由表 2 可知, 在两种类型土壤上, 添加生物质炭和有机物料对玉米根长无显著影响, 却不同程度对玉米株高和生物量有促进作用。在壤质潮土上, 添加生物质炭和秸秆对玉米生物量及株高没有显著影响, 而添加鸡粪的处理 CM 和 CM+BC 可以显著提高玉米生物量和株高, 与对照相比, 生物量分别提高 62.36%和 72.70%, 株高分别提高 21.09%和 22.46%; 在砂土上, 各处理均可显著提高玉米生物量和株高, 生物质炭和鸡粪的促进效果优于秸秆, BC、WS、CM、WS+BC、CM+BC 处理较对照处理的玉米生物量分别提高 57.15%、29.55%、58.70%、51.75%和 69.33%, 株高较对照分别提高 28.43%、21.93%、45.75%、29.72%和 42.05%。总体来看, 3 种有机物料中, 对玉米生物量和株高的影响依次为: 鸡粪>生物质炭>秸秆, 鸡粪和生物炭配施表现出最佳的促进效应。

表 2 生物质炭与有机物料对玉米生物量及长势的影响

Table 2 Effects of biochar and organic materials on maize biomass and growth conditions

| 处理 Treatment | 壤质潮土 Loamy fluvo-aquic soil | | | 砂土 Sandy soil | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 生物量 Biomass ($g\cdot plant^{-1}$) | 株高 Plant height (cm) | 根长 Root length (cm) | 生物量 Biomass ($g\cdot plant^{-1}$) | 株高 Plant height (cm) | 根长 Root length (cm) |
| CK | 9.80±1.03b | 51.46±1.65b | 24.31±1.71a | 8.47±0.40c | 42.33±2.03d | 22.20±2.14a |
| BC | 10.95±1.08b | 55.98±2.92ab | 25.05±1.18a | 13.31±0.83ab | 54.37±0.86bc | 22.32±1.99a |
| WS | 10.03±1.22b | 55.04±2.33ab | 28.83±1.33a | 10.97±0.20b | 51.62±1.42c | 21.20±1.21a |
| CM | 15.92±0.99a | 62.31±3.51a | 29.59±1.31a | 13.43±1.07ab | 61.72±1.25a | 26.70±1.85a |
| WS+BC | 10.57±0.79b | 59.67±1.97ab | 27.66±2.83a | 12.84±0.66ab | 54.92±1.77bc | 24.12±0.68a |
| CM+BC | 16.93±2.21a | 63.02±2.49a | 29.88±2.21a | 14.33±1.03a | 60.13±2.78ab | 27.93±2.54a |

CK: 对照; BC: 添加生物质炭; WS: 添加小麦秸秆; CM: 添加发酵鸡粪; WS+BC: 秸秆和生物质炭配施; CM+BC: 发酵鸡粪和生物质炭配施。不同字母表示同一土壤类型不同处理之间差异达显著水平($P$<0.05)。CK: untreated control; BC: adding biochar; WS: adding wheat straw; CM: adding chicken manure; WS+BC: adding wheat straw and biochar; CM+BC: adding chicken manure and biochar. Different letters mean significant differences among treatments in the same soil type at 0.05 level.



### 2.2 生物质炭与有机物料对土壤养分的影响

供试的壤质潮土和砂土呈碱性, pH 分别为 8.01 和 8.25, 添加碱性的生物质炭对两种土壤 pH 的影响并不显著, 而 WS+BC 处理显著增加了壤质潮土和砂土 pH, CM 和 CM+BC 处理显著降低了砂土 pH。另外, 在壤质潮土上, 单施秸秆和鸡粪对土壤有机质的提升作用不显著, 而添加生物质炭的 3 个处理 BC、WS+BC、CM+BC 可以显著提高土壤有机质含量, 增幅分别为 63.15%、84.84%、83.72%; 砂土的有机质含量较壤质潮土低, 各处理对砂土有机质的提升效果更明显, BC、WS、CM、WS+BC 和 CM+BC 处理均显著增加了土壤有机质含量, 增幅分别为 115.62%、37.88%、51.93%、177.57%和 114.09%。3 种有机物料单施对土壤全氮含量影响不显著, 而 WS+BC、CM+BC 显著增加了壤质潮土全氮含量, CM+BC 显著增加了砂土全氮含量(表 3)。总体来看, 添加有机物料对缓冲性能较弱的砂土有机质提升效果更明显, 生物质炭对土壤有机质的提升效果最佳。

3 种有机物料对土壤碱解氮的影响各异, 生物质炭表现出降低土壤碱解氮的效应, 并在砂土中达到显著水平, 秸秆对土壤碱解氮无显著影响, 而鸡粪可以显著增加壤质潮土和砂土中碱解氮含量, 增幅分别为 22.08%和 26.67%, 但是配施生物质炭后, CM+BC 处理对两种土壤碱解氮影响不显著。对于土壤速效磷, 在壤质潮土上, 施用生物质炭和鸡粪表现出显著的促进效应, 而单施秸秆影响不显著, BC、CM、WS+BC、CM+BC 处理较对照分别提高 83.52%、91.92%、80.33%和 171.26%; 在砂土上, 3 种有机物料均显著增加了土壤速效磷含量, 其中生物质炭和鸡粪的提升效果优于秸秆, BC、WS、CM、WS+BC 和 CM+BC 处理较对照分别提高 89.91%、36.69%、53.65%、92.88%和 116.19%。生物质炭和秸秆含有丰富的游离钾元素, 表现出对土壤速效钾含量的显著提升效果, 在壤质潮土上, BC、WS、WS+BC 和 CM+BC 处理较对照增幅为 79.38%、49.48%、129.89%、90.72%, 在砂土上增幅分别为 127.02%、63.02%、146.02%和 130.00%(表 3)。总体来看, 3 种有机物料对土壤速效养分的影响存在差异, 生物质炭可以大幅度提升土壤速效磷和钾含量, 却抑制了土壤和有机物料中氮的有效性, 鸡粪对土壤碱解氮和速效磷的提升效果明显, 而秸秆可以提升土壤速效钾含量, 生物质炭与鸡粪或秸秆配施能弥补各自不足, 更全面地提高土壤养分含量。

### 2.3 生物质炭与有机物料对土壤酶活性的影响

土壤酶活性是土壤质量重要的生物学指标。由表 4 可知, BC、WS、WS+BC 对砂土脲酶活性无显著影响, 却降低了壤质潮土脲酶活性, 而 CM 和 CM+BC 处理可以显著增加两种土壤的脲酶活性。各处理对土壤 L-天冬酰胺酶活性的影响各异, 在壤质潮土上, WS、WS+BC、CM+BC 可以显著增加土壤 L-天冬酰胺酶活性; 在砂土上, 各处理均可以显著增加土壤 L-天冬酰胺酶活性, 且单施秸秆的土壤 L-天冬酰胺酶活性高于其他处理。各处理对两种类型土壤蔗糖酶活性均无显著影响, 但在砂土上, WS 处理的土壤蔗糖酶活性显著高于 BC、CM、CM+BC 处理。

过氧化氢酶是参与土壤中物质和能量相互转化的一种氧化还原酶。壤质潮土中过氧化氢酶活性明显高于砂土, 且砂土过氧化氢酶活性对外源有机物料的输入更敏感。在壤质潮土上, BC、WS+BC、

表 3　生物质炭与有机物料对土壤养分状况的影响

Table 3　Effects of biochar and organic materials on soil nutrients conditions

| 土壤类型 Soil type | 处理 Treatment | pH | 有机质 Organic matter (g·kg$^{-1}$) | 全氮 Total N (g·kg$^{-1}$) | 碱解氮 Available N (mg·kg$^{-1}$) | 速效磷 Available P (mg·kg$^{-1}$) | 速效钾 Available K (mg·kg$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 壤质潮土 Loamy fluvo-aquic soil | CK | 7.99±0.03b | 12.27±0.29b | 1.07±0.01b | 89.83±1.17bc | 28.01±2.43c | 248.7±2.5d |
| | BC | 8.11±0.04ab | 20.01±1.52a | 1.11±0.05b | 75.83±3.08c | 51.40±4.81b | 446.1±23.4b |
| | WS | 8.09±0.06ab | 15.92±2.37b | 1.12±0.02b | 99.17±7.09ab | 33.56±1.38c | 371.7±18.4c |
| | CM | 8.00±0.04b | 15.34±0.79b | 1.03±0.02b | 109.67±4.67a | 54.67±4.20b | 269.2±11.7d |
| | WS+BC | 8.20±0.04a | 22.67±1.89a | 1.24±0.02a | 86.33±6.17bc | 50.51±4.07b | 571.7±21.9a |
| | CM+BC | 8.13±0.07ab | 22.54±1.02a | 1.21±0.03a | 92.17±3.08b | 75.98±4.76a | 474.3±6.7b |
| 砂土 Sandy soil | CK | 8.26±0.02b | 8.54±0.65d | 1.04±0.08ab | 70.00±3.50b | 43.40±2.61d | 256.4±10.3d |
| | BC | 8.33±0.08b | 18.42±0.17b | 1.14±0.02ab | 52.50±2.02c | 82.43±3.77b | 582.1±15.6b |
| | WS | 8.34±0.07b | 11.77±0.94c | 1.00±0.04b | 73.51±4.04b | 59.32±3.65c | 417.9±20.0c |
| | CM | 7.96±0.01c | 12.97±0.69c | 1.01±0.04b | 88.67±3.08a | 66.69±2.65c | 292.3±13.3d |
| | WS+BC | 8.54±0.02a | 23.69±1.53a | 1.07±0.05ab | 67.67±3.08b | 83.72±4.14b | 630.8±16.0a |
| | CM+BC | 8.10±0.04c | 18.27±0.49b | 1.18±0.01a | 77.00±3.55b | 93.84±2.41a | 589.7±6.8ab |

CK：对照；BC：添加生物质炭；WS：添加小麦秸秆；CM：添加发酵鸡粪；WS+BC：秸秆和生物质炭配施；CM+BC：发酵鸡粪和生物质炭配施。不同字母表示同一土壤类型不同处理之间差异达显著水平($P$<0.05)。CK: untreated control; BC: adding biochar; WS: adding wheat straw; CM: adding chicken manure; WS+BC: adding wheat straw and biochar; CM+BC: adding chicken manure and biochar. Different letters mean significant differences among treatments in the same soil type at 0.05 level.

CM+BC 处理显著增加了土壤过氧化氢酶活性，而 WS 和 CM 处理影响不显著；在砂土上，各处理均表现出增加土壤过氧化氢酶活性的效应，且添加生物质炭的处理 BC、WS+BC、CM+BC 显著高于 WS 和 CM 处理。土壤纤维素酶是一种复合酶，是降解土壤纤维素转化为葡萄糖的一组酶的总称。虽然秸秆中含有丰富的纤维素，但添加秸秆对两种土壤纤维素酶活性的影响并不显著，所有处理中只有 WS+BC 处理显著增加了砂土中纤维素酶活性。土壤 β-葡糖苷酶是土壤纤维素酶中的重要组成部分和限制因子，添加秸秆的两个处理 WS、WS+BC 可以大幅度提升两种土壤 β-葡糖苷酶的活性，其他处理影响不显著(表 4)。

表 4　生物质炭与有机物料对土壤酶活性的影响

Table 4　Effects of biochar and organic materials on soil enzyme activities

| 土壤类型 Soil type | 处理 Treatment | 脲酶 Urease [mg·g$^{-1}$·(24h)$^{-1}$] | L-天冬氨酸酶 L-aspartase [mg·g$^{-1}$·(24h)$^{-1}$] | 蔗糖酶 Invertase [mg·g$^{-1}$·(24h)$^{-1}$] | 过氧化氢酶 Catalase (mL·g$^{-1}$) | 纤维素酶 Cellulase [mg·(10g)$^{-1}$·(72h)$^{-1}$] | β-葡糖苷酶 β-glucosidase (μg·g$^{-1}$·h$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 壤质潮土 Loamy fluvo-aquic soil | CK | 2.81±0.09b | 1.17±0.01d | 14.11±0.66a | 8.50±0.07c | 14.59±1.21ab | 69.29±0.67b |
| | BC | 2.51±0.09c | 1.22±0.03cd | 14.70±0.29a | 8.79±0.04ab | 15.67±2.59ab | 73.67±2.51b |
| | WS | 2.36±0.04c | 1.27±0.02bc | 15.42±0.44a | 8.59±0.04bc | 18.34±0.6a | 105.23±1.34a |
| | CM | 3.95±0.05a | 1.19±0.02cd | 14.39±0.77a | 8.42±0.08c | 13.78±0.85b | 70.22±3.19b |
| | WS+BC | 2.39±0.05c | 1.36±0.02a | 13.76±0.26a | 8.83±0.08a | 15.55±0.49ab | 104.64±3.28a |
| | CM+BC | 3.81±0.07a | 1.34±0.04ab | 14.98±0.64a | 8.74±0.02a | 12.14±0.49b | 67.14±1.26b |
| 砂土 Sandy soil | CK | 2.80±0.07bc | 1.15±0.03c | 14.93±0.22ab | 7.04±0.04c | 14.04±0.79b | 77.95±2.47b |
| | BC | 2.62±0.09c | 1.30±0.03b | 14.24±0.83b | 7.83±0.08a | 13.8±0.47b | 72.34±1.88b |
| | WS | 3.01±0.09b | 1.40±0.03a | 16.98±1.09a | 7.44±0.03b | 14.45±1.14b | 124.01±2.86a |
| | CM | 3.83±0.12a | 1.26±0.02b | 13.29±0.31b | 7.33±0.08b | 13.58±0.79b | 81.13±5.09b |
| | WS+BC | 2.81±0.08bc | 1.30±0.03b | 15.44±0.64ab | 7.89±0.08a | 17.14±0.36a | 126.17±7.4a |
| | CM+BC | 3.71±0.16a | 1.29±0.02b | 13.72±0.35b | 7.79±0.11a | 12.98±0.9b | 79.04±5.96b |

CK：对照；BC：添加生物质炭；WS：添加小麦秸秆；CM：添加发酵鸡粪；WS+BC：秸秆和生物质炭配施；CM+BC：发酵鸡粪和生物质炭配施。不同字母表示同一土壤类型不同处理之间差异达显著水平($P$<0.05)。CK: untreated control; BC: adding biochar; WS: adding wheat straw; CM: adding chicken manure; WS+BC: adding wheat straw and biochar; CM+BC: adding chicken manure and biochar. Different letters mean significant differences among treatments in the same soil type at 0.05 level.

**2.4　应用主成分分析评价不同施肥条件下土壤肥力质量**

在壤质潮土上，应用主成分分析对不同有机材料施用下土壤养分含量和酶活性进行综合评价，所有主成分中只有第 1 主成分和第 2 主成分的特征值大于 1，方差贡献率分别为 47.39%和 27.78%，两者的累积方差贡献率达 75.16%，可以代表土壤肥力的主要影响因素。主成分是若干个指标的线性组合，由各单项在各主成分中的特征向量，可列出由标准化变量所表达的两个主成分 PC1 和 PC2 的关系式:

$$PC1=\underline{0.343\,9X_1}+\underline{0.320\,5X_2}-0.242\,7X_3+0.105\,8X_4+\underline{0.408\,8X_5}-0.258\,7X_6-0.173\,8X_7+\underline{0.363\,7X_8}+\underline{0.333\,2X_9}+\underline{0.327\,2X_{10}}+\underline{0.311\,7X_{11}} \quad (1)$$

$$PC2=\underline{0.312\,9X_1}+0.172\,3X_2+\underline{0.340\,2X_3}+\underline{0.524\,3X_4}+0.167\,8X_5+\underline{0.438\,0X_6}+\underline{0.281\,6X_7}-0.111\,9X_8+0.214\,8X_9-0.199\,0X_{10}-\underline{0.286\,3X_{11}} \quad (2)$$

式中: $X_1$ 代表有机质, $X_2$ 代表全氮, $X_3$ 代表碱解氮, $X_4$ 代表速效磷, $X_5$ 代表速效钾, $X_6$ 代表脲酶, $X_7$ 代表蔗糖酶, $X_8$ 代表过氧化氢酶, $X_9$ 代表 L-天冬酰胺酶, $X_{10}$ 代表纤维素酶, $X_{11}$ 代表 β-葡糖苷酶。公式中各变量的系数可以理解为各因子对主成分 PC1 和 PC2 中所占的权重，系数符号为正表示为正相关，符号为负表示为负相关，下划线表示对该主成分影响比较大的载荷因子，每个因子的载荷绝对值越大，表明对该主成分的贡献越大。由图 1a 可知，PC1 和 PC2 反映了不同的土壤肥力指标变化，PC1 主要反映了有机质、全氮、速效钾、过氧化氢酶、L-天冬酰胺酶、纤维素酶和 β-葡糖苷酶的变化，且均为正相关；PC2 主要反映了有机质、碱解氮、速效磷、脲酶、蔗糖酶和 β-葡糖苷酶的变化，其中 β-葡糖苷酶为负相关，其他均为正相关。

根据主成分关系式可以计算出各个处理 PC1 和 PC2 的得分，进一步通过综合主成分函数模型计算出综合主成分值，各处理得分排序为：WS+BC>CM+BC>BC>WS>CM>CK(图 2)。另外，通过各处理 PC1 和 PC2 得分可以看出，不同有机物料对土壤肥力的影响侧重不同，秸秆可以增加 PC1 所反映土壤肥力指标，鸡粪显著增加了 PC2 所反映土壤肥力指标，而生物质炭对 PC1 和 PC2 所反映土壤肥力指标均有提高，并且对 PC1 的增幅大于秸秆，对 PC2 的增幅小于鸡粪(图 1b)。

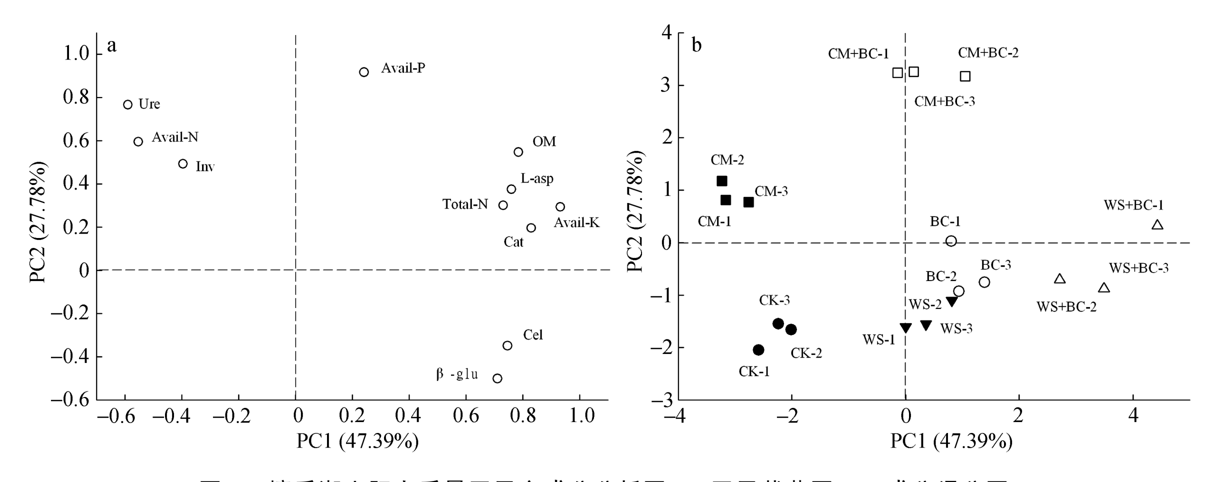



**图 1　壤质潮土肥力质量因子主成分分析图(a: 因子载荷图; b: 成分得分图)**

Fig. 1　Principal component analysis plots for loamy fluvo-aquic soil fertility quality factors (a: factor loading plot; b: component scores plot)

Ure: 脲酶; L-asp: L-天冬氨酸酶; Cel: 纤维素酶; β-glu: β-葡糖苷酶; Cat: 过氧化氢酶; Inv: 蔗糖酶; OM: 有机质; Total-N: 全氮; Avail-N: 碱解氮; Avail-P: 速效磷; Avail-K: 速效钾。CK: 对照; BC: 添加生物质炭; WS: 添加小麦秸秆; CM:添加发酵鸡粪; WS+BC: 秸秆和生物质炭配施; CM+BC: 发酵鸡粪和生物质炭配施。Ure: urease; L-asp: L-aspartase; Cel: cellulase; β-glu: β-glucosidase; Cat: catalase; Inv: invertase; OM: organic matter; Total-N: total N; Avail-N: available N; Avail-P: available P; Avail-K: available K. CK: untreated control; BC: adding biochar; WS: adding wheat straw; CM: adding chicken manure; WS+BC: adding wheat straw and biochar; CM+BC: adding chicken manure and biochar.

在砂土上，应用主成分分析对不同有机材料施用条件下土壤养分含量和酶活性进行综合评价，所有主成分中只有第 1 主成分、第 2 主成分和第 3 主成分的特征值大于 1，方差贡献率分别为 46.38%、21.45%和 13.64%，3 个主成分的累积方差贡献率达 81.47%，可以代表土壤肥力的主要影响因素。由标准化变量所表达的 3 个主成分 PC1、PC2 和 PC3 的关系式分别为:

$$PC1=\underline{0.412\,5X_1}+0.200\,1X_2-0.128\,5X_3+\underline{0.368\,2X_4}+\underline{0.430\,1X_5}-0.092\,8X_6-\underline{0.414\,6X_7}+\underline{0.407\,8X_8}+0.222\,1X_9+0.165\,8X_{10}+0.167\,3X_{11} \quad (3)$$

$$PC2=0.071\,2X_1+0.253\,8X_2+\underline{0.504\,7X_3}+\underline{0.329\,5X_4}+0.060\,3X_5+\underline{0.521\,7X_6}-0.073\,3X_7+0.107\,8X_8-0.026\,3X_9-\underline{0.380\,5X_{10}}-\underline{0.351\,7X_{11}} \quad (4)$$

$$PC3=0.022\,4X_1-\underline{0.413\,3X_2}+\underline{0.397\,3X_3}-0.017\,7X_4-0.101\,6X_5+\underline{0.421\,7X_6}+0.068\,1X_7-0.051\,5X_8+\underline{0.335\,3X_9}+\underline{0.253\,3X_{10}}+\underline{0.538\,8X_{11}} \quad (5)$$

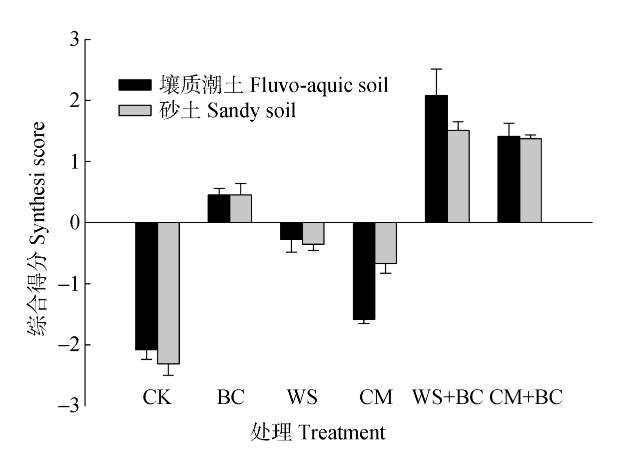


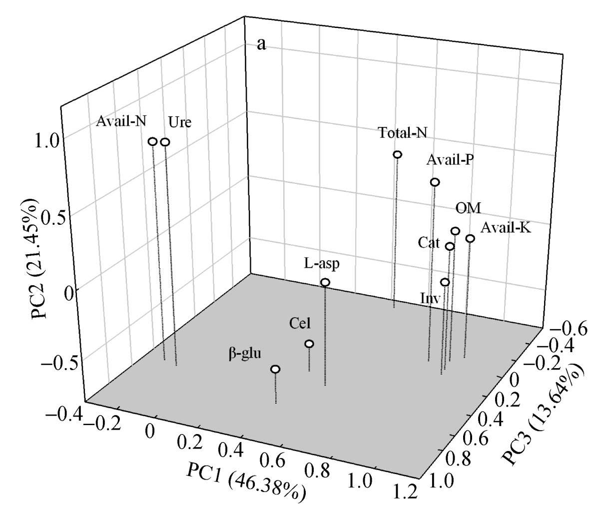

**图 2　生物质炭和有机物料对土壤肥力质量综合得分的影响**

Fig. 2　Effects of biochar and organic materials on the synthesis score of soil fertility

CK: 对照; BC: 添加生物质炭; WS: 添加小麦秸秆; CM: 添加发酵鸡粪; WS+BC: 秸秆和生物质炭配施; CM+BC: 发酵鸡粪和生物质炭配施。CK: untreated control; BC: adding biochar; WS: adding wheat straw; CM: adding chicken manure; WS+BC: adding wheat straw and biochar; CM+BC: adding chicken manure and biochar.

由图 3a 可知, PC1、PC2 和 PC3 反映了不同的土壤肥力指标变化, PC1 主要反映了有机质、速效磷、速效钾、蔗糖酶和过氧化氢酶的变化, 且均为正相关; PC2 主要反映了碱解氮、速效磷、脲酶、纤维素酶和 β-葡糖苷酶的变化, 其中纤维素酶和 β-葡糖苷酶为负相关, 其他指标为正相关; PC3 主要反映了全氮、碱解氮、脲酶、L-天冬酰胺酶、纤维素酶和 β-葡糖苷酶的变化, 其中全氮为负相关, 其他指标为正相关。

砂土上各处理主成分综合得分排序与壤质潮土一致, 排序为: WS+BC>CM+BC>BC>WS>CM>CK (图 2), 并且不同处理对土壤肥力的影响侧重不同。秸秆可以增加 PC1 和 PC3 所反映土壤肥力指标, 鸡粪可以增加 PC2 和 PC3 所反映土壤肥力指标, 生物质炭增加了 PC1 和 PC2 所反映土壤肥力指标, 并且对 PC1 的增幅大于秸秆, 对 PC2 的增幅小于鸡粪(图 3b)。另外, 通过相关分析发现, 在壤质潮土和砂土上, 玉米生物量和株高均与代表土壤氮磷供应正变化的第 2 主成分(PC2)得分呈极显著正相关, 说明土壤氮磷供应能力是限制玉米幼苗生长和生物量累积的主要因素(图 4)。



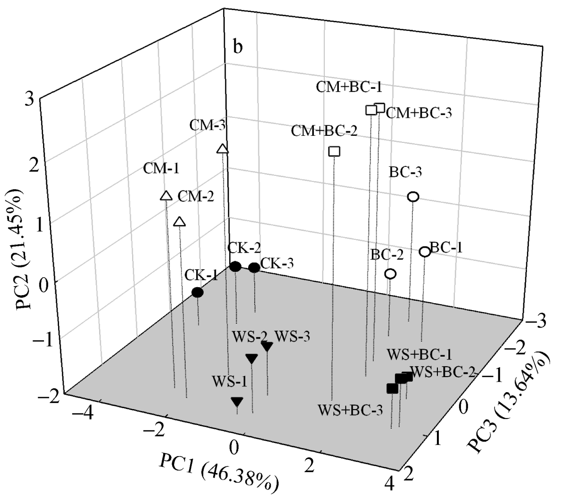




**图 3　砂土肥力质量主成分分析图(a: 因子载荷图; b: 成分得分图)**

Fig. 3　Principal component analysis plots for sandy soil fertility quality factors (a: factor loading plot; b: component scores plot)

Ure: 脲酶; L-asp: L-天冬氨酸酶; Cel: 纤维素酶; β-glu: β-葡糖苷酶; Cat: 过氧化氢酶; Inv: 蔗糖酶; OM: 有机质; Total-N: 全氮; Avail-N: 碱解氮; Avail-P: 速效磷; Avail-K: 速效钾。CK: 对照; BC: 添加生物质炭; WS: 添加小麦秸秆; CM:添加发酵鸡粪; WS+BC: 秸秆和生物质炭配施; CM+BC: 发酵鸡粪和生物质炭配施。Ure: urease; L-asp: L-aspartase; Cel: cellulase; β-glu: β-glucosidase; Cat: catalase; Inv: invertase; OM: organic matter; Total-N: total N; Avail-N: available N; Avail-P: available P; Avail-K: available K. CK: untreated control; BC: adding biochar; WS: adding wheat straw; CM: adding chicken manure; WS+BC: adding wheat straw and biochar; CM+BC: adding chicken manure and biochar.

## 3　讨论与结论

有机肥是重要的培肥改土材料, 既可以释放矿质养分供植物吸收, 也可以增加土壤有机质, 改善土壤物理性状, 促进土壤微生物活性和酶活性[26-27]。有机肥来源广泛、品种繁多, 种类和性质是决定其培肥作用的主要因素。本研究结果发现, 生物质炭可以显著提高土壤有机质、速效磷、速效钾含量, 但表现出降低土壤碱解氮的趋势, 并抑制了鸡粪中氮的有效性。生物质炭是一种富碳材料, 并含有丰富的磷和钾, 可以直接提高土壤碳储量及速效态的磷和钾, 但生物质炭在裂解过程中会造成氮挥发, 对土壤氮素的贡献非常有限[21,28], 且其多孔隙结构和含氧官能团会吸附和固定土壤和肥料中的 $NH_4^+$-N,

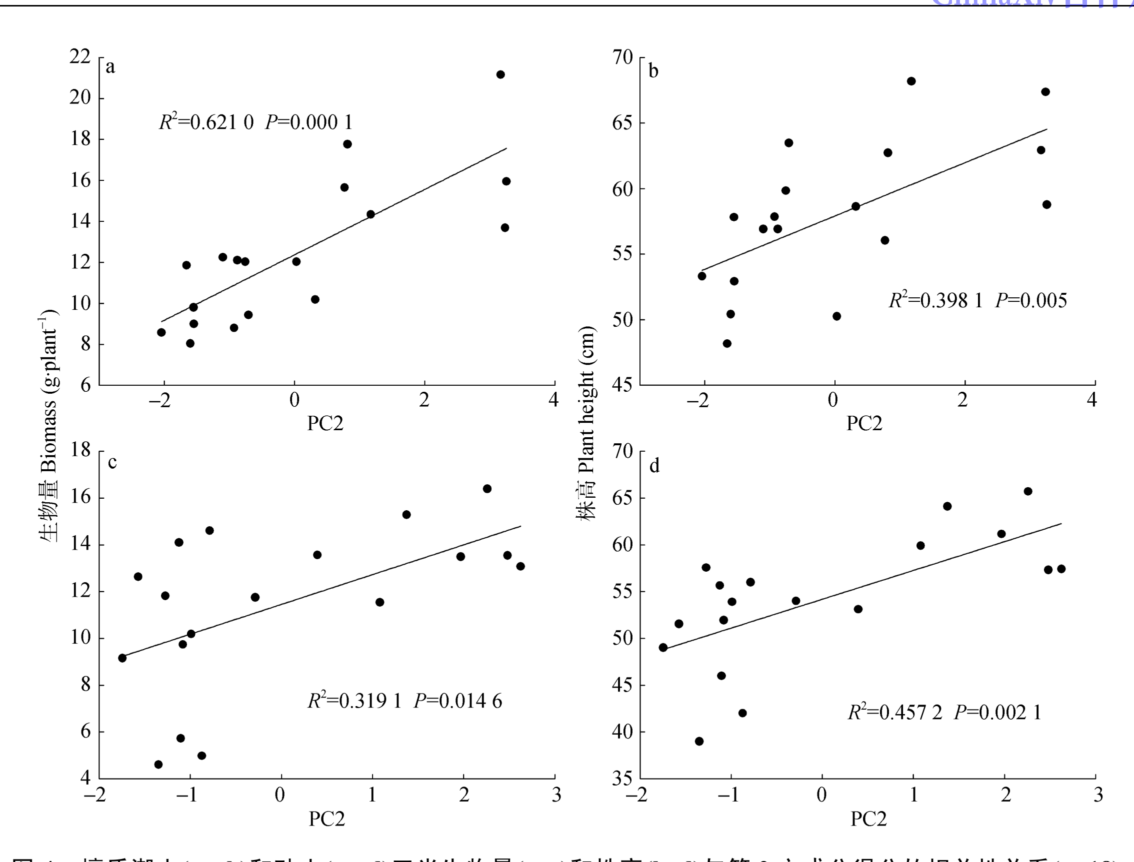



**图 4　壤质潮土(a、b)和砂土(c、d)玉米生物量(a, c)和株高(b, d)与第 2 主成分得分的相关性关系($n$=18)**

Fig. 4　Correlation between maize biomass (a, c) and plant height (b, d) in loamy fluvo-aquic soil (a, b) and sandy soil (c, d) with the second principal component (PC2) scores ($n$=18)

暂时降低土壤氮素的有效性[29]。发酵鸡粪含有丰富的有机态氮和磷，并且分解较快，可以提高土壤的供氮和供磷能力。谢育平等[30]也发现施用鸡粪可以显著提高土壤有机质、碱解氮和速效磷含量，这与本研究结果一致。农作物秸秆中的钾素主要以离子态存在，是一种重要的速效钾素资源，可以提高土壤速效钾含量[31]，本研究也得到相似结论。总体来看，3 种有机物料对土壤速效养分的影响存在差异，生物质炭可以提高土壤速效磷和钾含量，却抑制了土壤和有机物料中氮的有效性，鸡粪对土壤碱解氮和速效磷的提升效果明显，而秸秆可以提升土壤速效钾含量。

土壤酶活性是重要的生物学指标，对土壤养分循环具有重要的作用，相比土壤物理和化学性质，土壤酶活性能更敏感地对土壤质量的变化作出响应[32-33]。本研究结果表明，各处理对不同酶活性的影响各异，但总体来看，添加 3 种有机物料均可以提高土壤酶活性，这与相关研究结论一致[8,34]。本研究中，发酵鸡粪显著增加了两种土壤脲酶活性，而生物质炭和秸秆影响不显著，甚至降低了壤质潮土中脲酶活性。这可能是由于鸡粪含有更丰富的有机氮素，且其 C/N 较低，施入土壤后有机氮更易于矿化，刺激了土壤脲酶活性，而生物质炭和秸秆的 C/N 比较高，表现出抑制壤质潮土土壤脲酶的作用。土壤氧化还原酶是存在于土壤中的一种重要酶类，其对外源生物质炭的响应目前还存在争议。Yang 等[35]和 Masto 等[36]研究发现生物质炭可以大幅度提高土壤过氧化氢酶活性，这与本研究结果一致。但是生物质炭抑制土壤过氧化氢酶活性的报道也屡见不鲜[37-38]，供试土壤类型和生物炭制备条件及施用量的不同可能是导致上述结果的主要原因[39-40]。土壤纤维素酶是一种复合酶，是降解土壤纤维素转化为葡萄糖的一组酶的总称，土壤 β-葡糖苷酶是土壤纤维素酶中的重要组成部分和限制因子。虽然秸秆中含有丰富的纤维素，但添加秸秆对两种土壤纤维素酶活性的影响并不显著，却大幅度提升了两种土壤 β-葡糖苷酶的活性。因此，本研究条件下，土壤 β-葡糖苷酶可能是限制秸秆中纤维素分解的主要因子。

土壤的物理、化学和生物学性质均可以影响农作物的生长和生物量累积，为了能够综合评价不同处理下土壤肥力质量和限制玉米生长的主要土壤肥力因子，可以采用主成分分析对土壤肥力因子进行综合评价[41-42]。通过主成分分析发现，在壤质潮土和砂土上，各处理的土壤肥力综合得分排序均为：

WS+BC>CM+BC>BC>WS>CM>CK, 但不同的外源有机物料对不同主成分得分的贡献不同。在壤质潮土上, 可以将所有的土壤肥力因子分成 2 个主成分, 添加生物质炭和秸秆的土壤 PC1 得分较高, 而添加鸡粪的土壤 PC2 得分最高, 生物质炭次之, 秸秆无影响。通过相关分析发现, 玉米生物量和株高与土壤肥力质量综合得分无显著相关关系(数据未列出), 而与 PC2 得分呈极显著正相关关系。PC2 主要反映了有机质、碱解氮、速效磷、脲酶、蔗糖酶的正变化, 由于各处理对土壤蔗糖酶活性影响均不显著, 因此, 添加有机物料后, 其对土壤有机质以及供氮、磷能力的提升是其促进玉米生长的主要影响因子, 在砂土上也得到相似结论。这可能是由于本试验周期短, 以苗期玉米的生物量和株高为研究对象, 而氮和磷对苗期玉米植株的营养生长促进作用更显著。齐红志等[43]研究也发现, 氮亏缺对玉米苗期生长影响最大, 磷亏缺次之, 钾亏缺影响最小。3 种有机物料在田间条件下对玉米营养生长及籽粒产量的影响还有待进一步研究。

综上所述, 生物质炭、发酵鸡粪和秸秆均可以提高土壤养分含量及酶活性, 但表现出不同的侧重点。生物质炭可以提高土壤速效磷和钾以及过氧化氢酶活性, 却抑制了土壤和有机物料中氮的有效性; 鸡粪对土壤碱解氮、速效磷以及脲酶活性的提升效果明显, 而秸秆可以提升土壤速效钾和 β-葡糖苷酶活性。此外, 在本研究条件下, 土壤氮、磷供应能力是影响玉米苗期生长状况的主要因素, 鸡粪表现出最佳的促进效应, 生物质炭次之, 小麦秸秆无明显影响。采用主成分分析结合相关性分析的方法能够准确反映土壤肥力水平和预测土壤生产力状况, 并可以更直观地比较土壤肥力状况对外源有机物料投入的响应。整体来看, 秸秆和鸡粪表现出不同的土壤培肥效应, 而生物质炭对土壤肥力的提升作用更均衡, 且土壤肥力综合得分最高, 根据土壤养分障碍因子, 生物质炭与合适的有机物料配施是一种更全面的培肥改土措施。

## 参考文献 References


[1] Tilman D, Balzer C, Hill J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(50): 20260–20264

[2] 李睿. 我国粮食主产区农业生产要素投入的产出效应分析[J]. 南方农业学报, 2016, 47(1): 153–158
Li R. Analysis on output effect of agricultural production factor inputs in the main grain producing areas of China[J]. Journal of Southern Agriculture, 2016, 47(1): 153–158

[3] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008–1010

[4] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal — A review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(4): 219–230

[5] 姜灿烂, 何园球, 刘晓利, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 715–722
Jiang C L, He Y Q, Liu X L, et al. Effect of long-term application of organic manure on structure and stability of aggregate in upland red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(4): 715–722

[6] 孙宁科, 索东让. 有机肥与化肥长期配施对作物产量和灌漠土养分库的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(4): 42–46
Sun N K, Suo D R. Effects of long-term mixed use of organic manure and chemical fertilizers on crop yield and indigenous soil nutrients[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(4): 42–46

[7] Agegnehu G, Bird M I, Nelson P N, et al. The ameliorating effects of biochar and compost on soil quality and plant growth on a Ferralsol[J]. Soil Research, 2015, 53(1): 1–12

[8] 陶磊, 褚贵新, 刘涛, 等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6137–6146
Tao L, Chu G X, Liu T, et al. Impacts of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on cotton yield, soil microbial community and enzyme activities in mono-cropping system in drip irrigation condition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6137–6146

[9] Diacono M, Montemurro F. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30(2): 401–422

[10] Castaldi S, Riondino M, Baronti S, et al. Impact of biochar application to a Mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes[J]. Chemosphere, 2011, 85(9): 1464–1471

[11] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3/4): 443–449

[12] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. Plant and Soil, 2010, 333(1/2): 117–128

[13] 孟颖, 王宏燕, 于崧, 等. 生物黑炭对玉米苗期根际土壤氮素形态及相关微生物的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(3): 270–276
Meng Y, Wang H Y, Yu S, et al. Effect of biochar on nitrogen forms and related microorganisms of rhizosphere soil of seedling maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(3): 270–276

[14] Yuan H R, Lu T, Wang Y Z, et al. Sewage sludge biochar: Nutrient composition and its effect on the leaching of soil

nutrients[J]. Geoderma, 2016, 267: 17–23
[15] Zhang A F, Bian R J, Pan G X, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. Field Crops Research, 2012, 127: 153–160
[16] Liu J, Schulz H, Brandl S, et al. Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2012, 175(5): 698–707
[17] 李有兵, 把余玲, 李硕, 等. 作物残体与其生物炭配施对土壤有机碳及其自身矿化率的提升[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 943–950
Li Y B, Ba Y L, Li S, et al. Combined addition of crop residues and their biochar increase soil organic C content and mineralization rate[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(4): 943–950
[18] 彭辉辉, 刘强, 荣湘民, 等. 生物炭、有机肥与化肥配施对春玉米养分利用及产量的影响[J]. 南方农业学报, 2015, 46(8): 1396–1400
Peng H H, Liu Q, Rong X M, et al. Effects of biochar, organic fertilizer and chemical fertilizer combined application on nutrient utilization and yield of spring maize[J]. Journal of Southern Agriculture, 2015, 46(8): 1396–1400
[19] 赵占辉, 张丛志, 蔡太义, 等. 不同稳定性有机物料对砂姜黑土理化性质及玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(10): 1228–1235
Zhao Z H, Zhang C Z, Cai T Y, et al. Effects of different stable organic matters on physicochemical properties of lime concretion black soil and maize yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(10): 1228–1235
[20] 王典, 张祥, 姜存仓, 等. 生物质炭改良土壤及对作物效应的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 963–967
Wang D, Zhang X, Jiang C C, et al. Biochar research advances regarding soil improvement and crop response[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(8): 963–967
[21] Zhang Y, Tan Q L, Hu C X, et al. Differences in responses of soil microbial properties and trifoliate orange seedling to biochar derived from three feedstocks[J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(3): 541–551
[22] 张祥, 王典, 姜存仓, 等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8): 979–984
Zhang X, Wang D, Jiang C C, et al. Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the South China Region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(8): 979–984
[23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25–169
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25–169
[24] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274–388
Guan S Y. Soil Enzyme and Study Method[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 274–388
[25] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 121–135
Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, et al. The Determination Method and Application of Soil Microbial Biomass[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 121–135
[26] 荣勤雷, 梁国庆, 周卫, 等. 不同有机肥对黄泥田土壤培肥效果及土壤酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1168–1177
Rong Q L, Liang G Q, Zhou W, et al. Effects of different organic fertilization on fertility and enzyme activities of yellow clayey soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(5): 1168–1177
[27] 温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 91–99
Wen Y C, Li Y Q, Yuan L, et al. Comprehensive assessment methodology of characteristics of soil fertility under different fertilization regimes in north China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 91–99
[28] Amonette J E, Joseph S. Characteristics of biochar: Microchemical properties[J]. Journal of the Party School of Shengli Oilfield, 2013, 7(6): 1649–1654
[29] Spokas K A, Novak J M, Venterea R T. Biochar's role as an alternative N-fertilizer: Ammonia capture[J]. Plant and Soil, 2012, 350(1/2): 35–42
[30] 谢育平, 李慧兰, 邱才飞, 等. 长期施用鸡粪稻田土壤肥力变化特征研究[J]. 江西农业学报, 2012, 24(12): 111–113
Xie Y P, Li H L, Qiu C F, et al. Changes in fertility of paddy soils under long-term chicken manure application[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2012, 24(12): 111–113
[31] Li J F, Lu J W, Li X K, et al. Dynamics of potassium release and adsorption on rice straw residue[J]. PLoS One, 2014, 9(2): e90440
[32] Paz-Ferreiro J, Trasar-Cepeda C, Leirós M C, et al. Biochemical properties of acid soils under native grassland in a temperate humid zone[J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2007, 50(4): 537–548
[33] Paz-Ferreiro J, Trasar-Cepeda C, Leirós M C, et al. Biochemical properties in managed grassland soils in a temperate humid zone: Modifications of soil quality as a consequence of intensive grassland use[J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, 45(7): 711–722
[34] 黄东风, 王利民, 李卫华, 等. 培肥措施培肥土壤的效果与机理研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(2): 127–135
Huang D F, Wang L M, Li W H, et al. Research progress on the effect and mechanism of fertilization measure on soil fertility[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(2): 127–135
[35] Yang X, Liu J J, McGrouther K, et al. Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(2): 974–984
[36] Masto R E, Kumar S, Rout T K, et al. Biochar from water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and its impact on soil biological activity[J]. CATENA, 2013, 111: 64–71
[37] 冯爱青, 张民, 李成亮, 等. 秸秆及秸秆黑炭对小麦养分吸

收及棕壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5269–5277
Feng A Q, Zhang M, Li C L, et al. Effects of straw and straw biochar on wheat nutrient uptake and enzyme activity in brown soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5269–5277
[38] 潘全良, 宋涛, 陈坤, 等. 连续 6 年施用生物炭和炭基肥对棕壤生物活性的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(3): 225–232
Pan Q L, Song T, Chen K, et al. Influences of 6-year application of biochar and biochar-based compound fertilizer on soil bioactivity on brown soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(3): 225–232
[39] Bandara T, Herath I, Kumarathilaka P, et al. Role of woody biochar and fungal-bacterial co-inoculation on enzyme activity and metal immobilization in serpentine soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(3): 665–673
[40] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 生物炭对土壤酶活性和糜子产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 146–151
Shang J, Geng Z C, Chen X X, et al. Effects of biochar on soil enzyme activities and millet yield[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(2): 146–151
[41] 郭笃发, 王秋兵. 主成分分析法对土壤养分与小麦产量关系的研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 523–527
Guo D F, Wang Q B. Principal component analysis of relationship between various nutrients in albiudic cambosols profile and wheat yield[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(3): 523–527
[42] 叶协锋, 杨超, 李正, 等. 绿肥对植烟土壤酶活性及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 445–454
Ye X F, Yang C, Li Z, et al. Effects of green manure in corporation on soil enzyme activities and fertility in tobacco-planting soils[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 445–454
[43] 齐红志, 刘天学, 杜成凤, 等. 玉米苗期对氮、磷、钾亏缺的响应及基因型差异[J]. 河南农业大学学报, 2011, 45(2): 142–148
Qi H Z, Liu T X, Du C F, et al. Responses of maize to nitrogen, phosphorus and potassium deficiency at seedling stage and differences among cultivars[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2011, 45(2): 142–148